荒漠灌丛土壤酶活性对UV-B辐射及凋落物分解的响应

韦昌林， 李 毅， 单立山， 解婷婷
（甘肃农业大学林学院，甘肃 兰州 730070）

摘 要： 探究土壤酶活性对UV-B辐射和不同凋落物分解的响应对揭示凋落物周转及土壤养分动态具有重要意义。采用模拟UV-B辐射滤减（聚脂薄膜法）和分解袋法，研究了UV-B辐射变化对西北干旱荒漠区典型灌丛红砂和珍珠以及二者的混合凋落物层下土壤酶活性的影响。结果表明：(1) 辐射滤减提高了不同凋落物土壤脲酶和碱性磷酸酶活性，且对珍珠灌丛土壤酶活性的促进作用更明显，不同土层（0~5 cm和5~15 cm）分别增加了45.45%、58.28%和39.04%、117.65%；然而，辐射滤减降低了不同凋落物土壤多酚氧化酶和木质素过氧化物酶活性，同样对珍珠灌丛土壤酶活性的抑制效应更明显，不同土层分别减少了36.69%、39.52%和59.78%、43.63%；辐射滤减对土壤纤维素酶活性无明显效应。(2) 在辐射滤减和自然光照条件下，混合凋落物土壤多酚氧化酶活性均小于单一凋落物，说明混合凋落物土壤中有机质的腐殖化程度大于有机质的积累，土壤腐殖化程度更高。(3) 不同类型凋落物对表层土壤（0~5 cm）酶活性的影响更为明显；随着土层加深，各类型下土壤脲酶和磷酸酶活性均降低，多酚氧化酶活性增加。

关键词： UV-B辐射；凋落物；干旱荒漠；土壤酶

土壤酶是土壤代谢的主要动力，土壤中一切生物化学作用都是在其催化下完成的[1]。它不但是植物营养元素的活性库，也能够表征土壤碳、氮、磷等养分的循环状况[2]。土壤酶活性受到非生物因素和生物因素的影响。近年来环境污染导致臭氧层变薄，最终使得到达地面的辐射增强，尤其是UV-B辐射[3]，这势必会对土壤酶活性造成影响。同时，土壤酶活性也受到凋落物分解的影响，土壤酶反过来又会对凋落物分解产生影响。凋落物的彻底降解最终是在土壤微生物酶解作用下完成的，土壤中酶活性的高低直接决定着凋落物的分解速率[4]。研究UV-B辐射与凋落物分解2种因素对土壤酶活性的影响对阐述生态系统中凋落物及土壤物质能量动态具有重要意义[5]。

UV-B辐射是对地球生物产生直接影响的紫外辐射[6]，其变化对陆地生态系统的影响已成为全球环境变化研究中的前沿和热点问题之一[7]。有研究表明，UV-B辐射增强导致稻田土壤多酚氧化酶和蔗糖酶的活性降低，纤维素酶活性增加[8]，导致大豆根际土壤脲酶、转化酶和磷酸酶活性降低[9]。也有研究认为，UV-B辐射增强不足以对大麦根际土壤酶活性产生显著影响[10]，而顾夏天[11]的研究表明，UV-B辐射增强对土壤酶活性的影响因大麦品种而异。可见，UV-B辐射对土壤酶活性的影响因土壤酶种类和作物的不同而表现出差异。也有大量研究指出，凋落物的添加对土壤酶活性的影响因凋落物类型而异，林晗等[12]指出，千年桐与毛竹凋落叶混合分解相比单一凋落叶在不同程度上增强了土壤脲酶、蔗糖酶等土壤酶的活性。陈光升[13]的研究中发现，凋落物对土壤酶活性的影响竹林较光皮桦林更为明显。张冰冰等[14]发现，不同凋落物对土壤酶活性的影响不同，毛竹、马尾松、樟树等多种树种对土壤

收稿日期： 2021-09-07；**修订日期：** 2022-03-18
基金项目： 国家自然科学基金项目（31960245，32160253）；甘肃农业大学公招博士科研启动基金项目（GAU-KYQD-2018-07）；对发展中国家科技援助项目（KY202002011）
作者简介： 韦昌林（1998-），女，硕士研究生，主要从事干旱区植物生理生态研究. E-mail: 2603572411@qq.com
通讯作者： 李毅. E-mail: liyi@gsau.edu.cn

酶活性的影响因凋落物类型而各异。然而,已有的研究多集中在凋落物或UV-B辐射对土壤酶活性的影响[8-12],而双因素对土壤酶活性作用的研究还相对较少,且已有的研究多集中于森林生态系统[4,12,15-16],对于干旱荒漠生态系统的研究较少。因此,开展UV-B辐射条件下荒漠灌丛凋落物层下土壤酶活性特征的研究对于阐述荒漠生态系统凋落物和土壤有机质的分解、养分元素的释放以及生态系统的物质循环和能量流动具有重要意义。

红砂(*Reaumuria soongarica*)和珍珠(*Salsola passerina*)是我国干旱和半干旱地区广泛分布的植物种,耐旱、耐盐碱,对环境适应性强、可塑性大,二者常互为共建种组成混生群落,对荒漠地区生态环境稳定性维护有重要作用[17]。目前,关于红砂与珍珠的研究主要集中在根、茎、叶、种子形态特征以及遗传育种等方面[18-19],而关于UV-B辐射对其凋落物层下土壤酶活性的研究很少。因此,本研究通过分析红砂和珍珠以及二者混合凋落物层下土壤酶活性对UV-B辐射的响应,以期为我国干旱荒漠生态系统凋落物管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于河西走廊中部的典型干旱荒漠区临泽内陆河流域荒漠生态系统综合观测场(39°41′N,100°12′E)内,是典型的大陆性干旱荒漠气候,干燥多风,昼夜温差大,年平均气温7.6 ℃,降水量少且蒸发量大,降水主要集中在7—9月,年平均降水量117 mm,年平均蒸发量高达2000~3000 mm[17]。光照充足,年平均日照数为3053 h。土壤主要以风沙土类型为主,土壤含水率12%,相对湿度75%,有机质含量4.65 $g\cdot kg^{-1}$,全氮0.22 $g\cdot kg^{-1}$,全磷0.32 $g\cdot kg^{-1}$,碱解氮18.7 $mg\cdot kg^{-1}$,有效磷6.3 $mg\cdot kg^{-1}$,速效钾75 $mg\cdot kg^{-1}$。植被主要由荒漠戈壁植被、沙漠植被等组成,其中沙漠植被主要以灌木为主。

1.2 研究方法

1.2.1 实验设计 在2020年6月30日—2021年6月30日进行模拟UV-B辐射滤减实验,共设置2种处理,分别为模拟UV-B辐射滤减处理和自然光照(对照)处理。每个处理6个重复,每个处理设置一块样方,共计12块样方。

模拟UV-B辐射滤减采用国内外通用的聚酯薄膜法[20],用聚酯薄膜过滤部分UV-B辐射。进行紫外辐射处理的样方在距离凋落物上方30 cm处,架设125 μm厚的聚酯薄膜,每个样地的面积均为2.0 m×2.0 m,2个月更换1次薄膜以防老化。同时在进行紫外辐射处理的样方旁放置与样地面积相等底面积的铁皮盒子,用来收集降水并在每次降水事件发生后由人工在8 h之内将收集的降水均匀地洒入样地,以保证辐射滤减样地与自然光照样地内降水量的一致。前人研究结果表明,UV-B滤减环境比自然环境减少了22.1%[15]。UV-B辐射滤减下气温比自然光照低14.2%,土壤温度比自然光照低18.4%。

1.2.2 凋落物的采集和布设 设置3种凋落物类型,分别是红砂、珍珠、红砂+珍珠。2019年10月,在红砂和珍珠的叶片临近凋落时,在围封样地内,选取各方面相对一致的灌丛收集新鲜凋落叶,将收集的样品带回实验室内自然风干。将风干后的凋落物一部分形成2种单一凋落物,另一部分按红砂和珍珠凋落物各50%进行混合,形成混合凋落物,将3种凋落物各称取10 g分别装入10 cm×10 cm的尼龙网袋(网眼0.1 mm),于2020年6月将3种凋落物各12袋随机布设于每个样方的土壤表面,并用铁丝固定。

1.2.3 土壤取样 于试验开始后1 a(2021年6月30日)进行土壤取样,在凋落物袋下方,用内径5 cm的土钻,钻取0~5 cm、5~15 cm的土壤。将所取的土样自然风干后过筛,用于酶活性测定。

1.3 指标测定方法

土壤脲酶活性采用苯酚钠-次氯酸钠比色法进行测定,以24 h后1 g土壤中NH_3-N的微克数表示1个酶活性单位;土壤碱性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定,以24 h后1 g土壤中释放出酚的微克数表示1个酶活性单位;土壤纤维素酶活性采用3,5-二硝基水杨酸比色法测定,以72 h后1 g土壤中产生的葡萄糖毫克数表示1个酶活性单位;土壤多酚氧化酶活性采用邻苯三酚比色法测定,以24 h后1 g土壤中产生紫色没食子素的毫克数表示1个酶活性单位;土壤木质素过氧化物酶活性采用藜芦醇氧化速率法测定,以每克土壤每分钟生成1 nmol藜芦醛所需的酶量定义为1个酶活性单位[21]。

1.4 数据处理

采用Excel 2007软件进行数据整理;采用SPSS

21.0进行统计分析，采用Origin 2019作图。对各种参数的差异性比较采用单因素方差分析，对不同辐射条件与不同凋落物类型交互作用对土壤酶活性的影响采用双因素方差分析，显著性水平为$P<0.05$，图中误差棒均为标准误差。

2 结果与分析

2.1 UV-B辐射滤减对不同凋落物土壤脲酶活性的影响

由表1可以看出，辐射和凋落物类型以及二者的交互作用均对0~5 cm土层脲酶活性有极显著影响($P<0.01$)；在5~15 cm只有辐射对土壤脲酶活性具有显著影响($P<0.05$)。由图1可知，同一凋落物类型下，各土层辐射滤减处理下的土壤脲酶活性均高于自然光照，其中珍珠凋落物在2层土壤中均达到显著水平，分别高出45.45%和58.28%。同一辐射条件下，0~5 cm土层中，自然光照处理下珍珠凋落物土壤脲酶活性显著高于混合凋落物，高出88.32%；在2个土层中，辐射滤减处理下珍珠凋落物土壤脲酶活性均显著高于红砂和混合凋落物，分别高150.83%、116.37%和32.52%、57.56%。同一辐射条件、同一凋落物类型下随着土层加深，土壤脲酶活性降低。

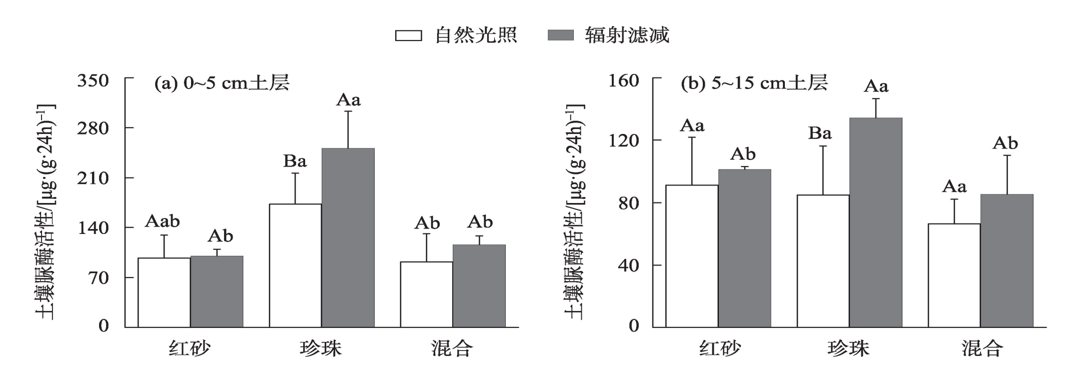
2.2 UV-B辐射滤减对不同凋落物土壤碱性磷酸酶活性的影响

由表2可知，辐射和凋落物类型以及二者的交互作用均对0~5 cm土层碱性磷酸酶活性有显著影响($P<0.05$)，其中辐射和凋落物类型对其具有极显著影响($P<0.01$)；辐射和交互对5~15 cm土壤磷酸酶活性具有极显著影响($P<0.01$)。由图2可知，同一凋落物类型下，辐射滤减处理下凋落物土壤磷酸酶活性均高于自然光照，其中在0~5 cm土层中，珍珠达到显著水平，高出39.04%；在5~15 cm土层中，红砂和珍珠达到显著水平，分别高出106.61%和117.65%。对于同一辐射处理下不同凋落物而言，0~5 cm土层中，自然光照处理下红砂和混合凋落物土壤磷酸酶活性显著高于珍珠，分别高出51.95%和35.38%；辐射滤减处理下红砂显著高于珍珠，高出14.51%。5~15 cm土层中，自然光照处理下混合显著高于红砂，高出37.85%；辐射滤减处理下红砂和

表1 凋落物层下土壤脲酶活性的ANOVA结果

Tab. 1 ANOVA results of urease activity in subsoil of litters

	因变量	平方和	自由度	均方	统计检定值	显著性
0~5 cm土层脲酶	辐射	3801.85	1	3801.85	96.12	$P<0.01$
	类型	49202.83	2	24601.41	19.99	$P<0.01$
	辐射×类型	1322.31	2	661.16	16.71	$P<0.01$
5~15 cm土层脲酶	辐射	5632.65	1	5632.65	0.58	$P<0.05$
	类型	100.67	2	50.34	1.27	$P=0.32$
	辐射×类型	4534.80	2	2267.40	1.84	$P=0.20$



注：大写字母表示同一凋落物类型不同辐射处理下差异性显著；小写字母表示同一辐射处理不同凋落物类型下差异性显著。下同。

图1 不同处理下土壤脲酶活性

Fig. 1 Soil urease activity under different treatments

表2 凋落物层下土壤碱性磷酸酶活性的ANOVA结果

Tab. 2 ANOVA results of alkaline phosphatase activity in subsoil of litters

	因变量	平方和	自由度	均方	统计检定值	显著性
0~5 cm土层脲酶	辐射	621.48	1	621.48	13.91	$P<0.01$
	类型	1525.50	2	762.75	17.08	$P<0.01$
	辐射×类型	357.11	2	178.55	3.99	$P<0.05$
5~15 cm土层脲酶	辐射	3801.85	1	3801.85	96.12	$P<0.01$
	类型	100.67	2	50.34	1.27	P=0.32
	辐射×类型	1322.31	2	661.16	16.72	$P<0.01$

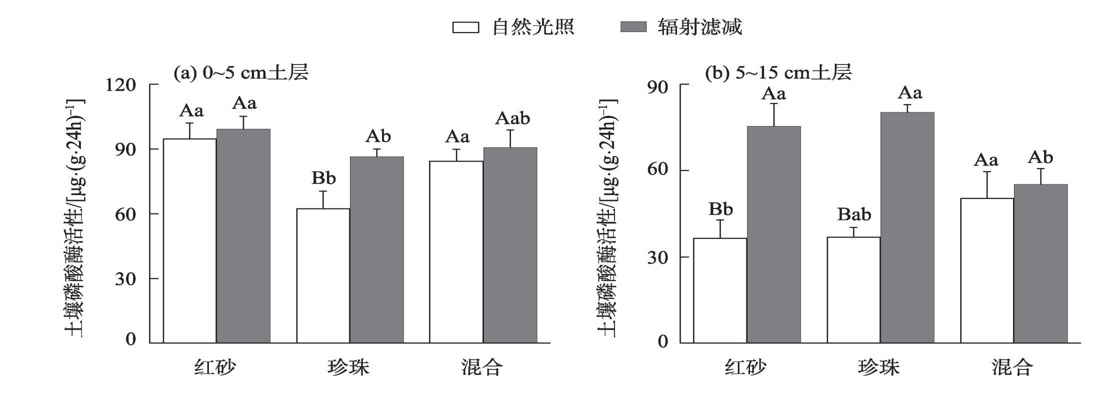


图2 不同处理下土壤碱性磷酸酶活性

Fig. 2 Soil alkaline phosphatase activity under different treatments

珍珠显著高于混合，分别高出36.41%和45.24%。同一辐射条件、同一凋落物类型下随着土层加深，土壤磷酸酶活性降低。

2.3 UV-B辐射滤减对不同凋落物土壤纤维素酶活性的影响

由表3可知，凋落物类型以及交互均对0~5 cm土层纤维素酶活性有极显著影响（$P<0.01$）；交互作用对5~15 cm土壤纤维素酶活性具有极显著影响（$P<0.01$）。由图3可知，同一凋落物类型下，红砂凋落物土壤纤维素酶活性在2层土壤中均表现为自然光照处理显著高于辐射滤减处理，分别高出116.08%和148.55%。对于同一辐射处理下不同凋落物而言，0~5 cm土层中，自然光照下红砂显著高于珍珠和混合，分别高出122.89%和95.80%；辐射滤减下珍珠显著高于混合，高出148.70%。5~15 cm土层中，自然光照下红砂和混合显著高于珍珠，分别高出130.37%和128.65%；辐射滤减下混合显著高于红砂和珍珠凋落物，分别高出245.88%和116.85%。

2.4 UV-B辐射滤减对不同凋落物土壤多酚氧化酶活性的影响

由表4可知，除交互对0~5 cm土层具有显著影响外（$P<0.05$），辐射、凋落物类型以及二者的交互均对0~15 cm土层多酚氧化酶活性具有极显著影响（$P<0.01$）。由图4可知，同一凋落物类型下，自然光

表3 凋落物层下土壤纤维素酶活性的ANOVA结果

Tab. 3 ANOVA results of cellulase activity in subsoil of litters

	因变量	平方和	自由度	均方	统计检定值	显著性
0~5 cm土层脲酶	辐射	13.01	1	13.01	0.58	P=0.46
	类型	235.01	2	117.51	15.96	$P<0.01$
	辐射×类型	362.66	2	181.33	8.11	$P<0.01$
5~15 cm土层脲酶	辐射	0.01	1	0.01	0.00	P=0.98
	类型	142.54	2	71.27	3.19	P=0.08
	辐射×类型	141.81	2	70.90	9.63	$P<0.01$

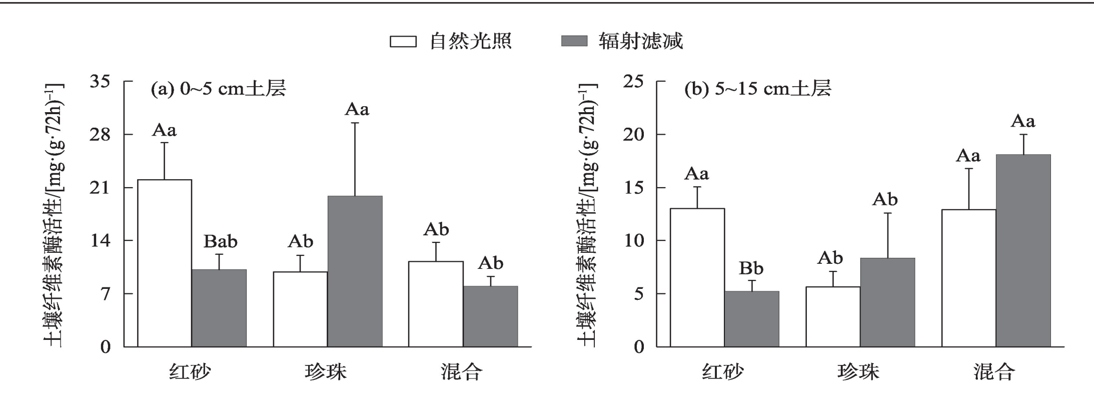


图3　不同处理下土壤纤维素酶活性

Fig. 3　Soil cellulase activity under different treatments

表4　凋落物层下土壤多酚氧化酶活性的ANOVA结果

Tab. 4　ANOVA results of polyphenol oxidase activity in subsoil of litters

	因变量	平方和	自由度	均方	统计检定值	显著性
0~5 cm土层脲酶	辐射	31.72	1	31.73	16.50	$P<0.01$
	类型	78.09	2	39.04	20.30	$P<0.01$
	辐射×类型	23.11	2	11.55	6.01	$P<0.05$
5~15 cm土层脲酶	辐射	43.25	1	43.25	27.67	$P<0.01$
	类型	33.46	2	16.73	10.70	$P<0.01$
	辐射×类型	30.24	2	15.12	9.67	$P<0.01$

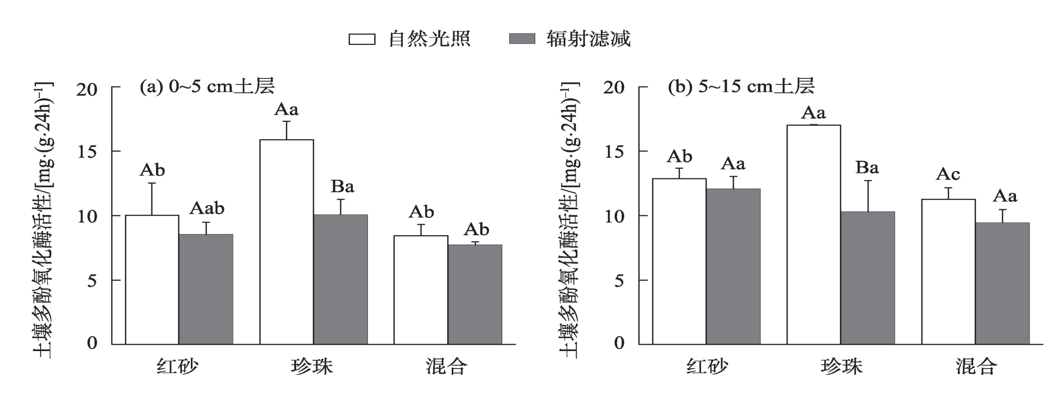


图4　不同处理下土壤多酚氧化酶活性

Fig. 4　Soil polyphenol oxidase activity under different treatments

照处理下凋落物土壤多酚氧化酶活性均高于辐射滤减,其中,珍珠在2层土层中达到显著水平,分别高出57.94%和65.34%。对于同一辐射处理下不同凋落物而言,0~5 cm土层中,自然光照下珍珠显著高于红砂和混合,分别高出58.745%和88.64%;辐射滤减下珍珠显著高于混合,高出30.05%。5~15 cm土层中,自然光照下3种凋落物土壤多酚氧化酶活性差异显著,表现为:珍珠 > 红砂 > 混合。同一辐射处理、同一凋落物类型下随着土层加深,土壤多酚氧化酶活性增大。

2.5　UV-B辐射滤减对不同凋落物土壤木质素过氧化物酶活性的影响

由表5可知,辐射对2层土壤木质素过氧化物酶活性均具有显著影响($P<0.05$)。由图5可知,同一凋落物类型下,在0~5 cm土层中,珍珠凋落物土壤木质素过氧化物酶活性在自然光照下显著高于辐射滤减,高出148.61%。对于同一辐射处理下不同凋落物而言,0~5 cm土层中,自然光照处理下珍

表5 凋落物层下土壤木质素过氧化物酶活性的ANOVA结果

Tab. 5 ANOVA results of lignin peroxidase activity in subsoil of litters

	因变量	平方和	自由度	均方	统计检定值	显著性
0~5 cm土层脲酶	辐射	8.93	1	8.94	6.87	$P<0.05$
	类型	4.81	2	2.41	1.85	$P=0.20$
	辐射×类型	6.88	2	3.44	2.65	$P=0.11$
5~15 cm土层脲酶	辐射	5.13	1	5.13	5.29	$P<0.05$
	类型	5.69	2	2.85	2.93	$P=0.09$
	辐射×类型	4.44	2	2.22	2.29	$P=0.14$

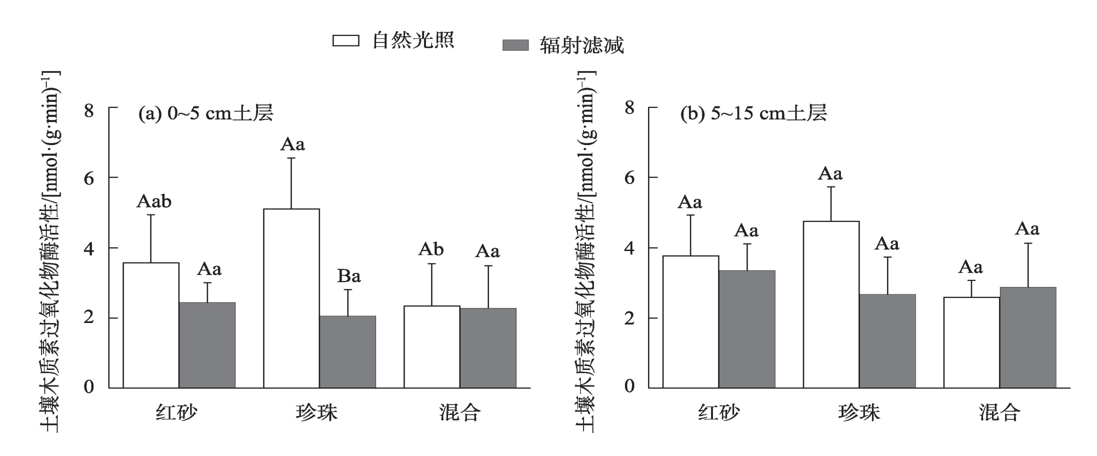


图5 不同处理下土壤木质素过氧化物酶活性

Fig. 5 Soil lignin peroxidase activity under different treatments

珠显著高于混合,高出118.03%。

3 讨论

3.1 UV-B辐射对土壤酶活性的影响

土壤酶是生态系统代谢的一类重要动力,主要来源于动植物及其残体和微生物的分泌,它能够影响土壤有机物的合成、分解与转化[16]。大量研究表明,全球气候变化引起温度及降水等一系列的变化会对土壤酶活性产生影响[22],其中UV-B辐射滤减可以通过降低凋落物和土壤温度来影响土壤酶活性[9]。

本研究发现,UV-B辐射对土壤酶活性的影响表现并不一致,因土壤酶的种类、凋落物类型及土壤深度而表现出差异性。具体表现为:UV-B辐射滤减可以提高不同凋落物土壤脲酶和碱性磷酸酶活性,这与张令瑄等[23]和吕志伟等[9]的研究结果一致,这可能是因为辐射滤减减弱了干旱区的土壤温度,从而减少了土壤水分蒸发,进而增加了土壤酶活性。然而,娄运生等[10]发现,UV-B辐射对大麦根系土壤脲酶和磷酸酶活性无显著影响,这可能是因为UV-B辐射对土壤的作用受到大麦作物的影响而削减或者是设置的梯度不足以使土壤酶对辐射作出响应。有研究指出土壤脲酶和磷酸酶都是水解酶,与土壤氮、磷循环密切相关[24-25]。土壤脲酶能将高分子化合物水解成为植物和微生物易吸收的营养物质[24]。土壤磷酸酶可以将不能被植物吸收利用的无效磷在酶促作用下转化为植物可利用的形态[25]。辐射滤减增加了这2种酶的活性,可见辐射滤减能够提高土壤的营养转化,进而可能会促进植物的生长。

本研究还发现,UV-B辐射滤减对土壤纤维素酶活性没有显著影响,对不同凋落物土壤多酚氧化酶和木质素过氧化物酶则有着与脲酶和磷酸酶相反的效应。辐射滤减使得土壤多酚氧化酶和木质素过氧化物酶活性低于自然光照,这可能是因为辐射滤减减少了到达地面的紫外线,从而降低了凋落物及土壤温度,进而降低了土壤多酚氧化酶活性,这与陈晓丽等[26]发现增温可以使土壤多酚氧化酶活性增加的结果一致。有研究指出,土壤多酚氧化酶和木质素过氧化物酶与凋落物分解和土壤腐殖化

程度息息相关,二者皆是氧化还原酶,多酚氧化酶可以催化邻苯二酚氧化成邻苯二醌[27],木质素过氧化物酶是木质素的生物降解过程中的主要木质素降解酶类[28],2种酶能够酶解凋落物中较难分解的酚类和木质素。辐射滤减下这2种酶的活性较低,可能与凋落物分解程度对UV-B辐射滤减下温度降低的响应有关。有机残体分解提供了组成腐殖质分子的原始材料,在多酚氧化酶的作用下进一步缩合形成复杂而稳定的腐殖质,多酚氧化酶作为可以评价土壤腐殖化的指标,其活性与土壤腐殖化程度呈负相关[29]。说明土壤中的植物残体使微生物活动增加,多酚氧化酶消耗,从而增加了有机质的腐殖化程度[30]。辐射滤减降低了多酚氧化酶的活性,说明滤减条件下土壤腐殖化程度较高,进而可能提高土壤养分,促进植物生长。相反,近年来臭氧层的持续破坏导致的UV-B辐射增强可能会影响土壤酶活性进而影响土壤有机物,从而削弱土壤对植物的营养供应,对植物生长产生不利影响。

3.2 不同类型凋落物层对土壤酶活性的影响

土壤酶活性除受环境因素影响外,还与凋落物降解及养分归还密切相关,凋落物的组成和性质是影响酶活性的主要因素[16]。凋落物化学组成的不同导致凋落物输入到土壤中的养分有差异,从而影响微生物活性,使土壤酶活性有差异。本研究发现,凋落物类型对不同土层土壤酶活性具有不同程度的影响。对表层(0~5 cm)土壤脲酶、磷酸酶、纤维素酶和多酚氧化酶都有极显著影响,对木质素过氧化物酶则无显著影响;对深层(5~15 cm)土壤多酚氧化酶影响显著,对其他4种酶均无显著影响。说明凋落物对表层土壤酶活性的影响较深层土壤更加显著,原因可能是表层土壤与凋落物直接接触,对不同凋落物类型的响应较为明显。同时,随着土层的加深,各类型下土壤脲酶和磷酸酶活性均降低,多酚氧化酶活性增加。说明表层土壤积累了较多的枯落物,养分高、通气好、微生物代谢旺盛。

有研究表明,凋落物的混合并不是简单的加合效应,凋落物多样性的多寡对其分解的影响十分复杂,受到物种组成、元素含量等多种因子的影响[31]。本研究发现在辐射滤减和自然光照条件下,无论红砂还是珍珠,其多酚氧化酶活性均大于混合效应,表现出负效应,这与胡亚林等[29]得出混合凋落物降低土壤多酚氧化酶活性的结论一致。土壤多酚氧化酶活性与腐殖化程度呈负相关,表明混合凋落物土壤腐殖化程度最高,混合凋落物较单一凋落物来说可能对提高土壤肥力的作用更为明显。这可能是因为土壤酶主要来源于微生物,混合凋落物比单一凋落物含有更高的微生物生物量,其凋落物的酶活性也比较高,混合凋落物在分解过程中产生的不同产物往往能增加酶催化底物的有效性,这有助于微生物的生长和酶的表达[32]。同时本研究还发现混合凋落物土壤纤维素酶、脲酶活性均低于单一凋落物,同样表现出负效应,磷酸酶活性在自然光照下表现出正效应,而在辐射滤减下表现出负效应,且深层土壤比表层土壤表现出更强的正负效应。这与李茜[33]发现混合凋落物提高土壤脲酶和磷酸酶的结果不一致,可能是因为不同混合树种的化学组成不同,混合后产生的相互作用也不同,进而对土壤养分的输入不同,从而导致对土壤酶产生不同的效应。有研究指出不同配比的混合凋落物也会对土壤酶活性有不同的效应[12],所以未来加强这方面的研究可能会有助于更全面的了解凋落物与土壤的转换机制。

凋落物自身性质的不同也能引起土壤酶活性的变化[34]。本研究对2种不同物种的单一凋落物层下土壤酶活性也进行了比较,发现红砂凋落物土壤磷酸酶活性高于珍珠,脲酶和多酚氧化酶活性低于珍珠,且珍珠对UV-B辐射的响应更为敏感。凋落物对土壤酶活性产生不同的影响,主要原因可能是不同凋落物使得土壤微生物组成、数量以及代谢发生改变,从而使得土壤酶活性发生变化[35]。珍珠作为一种C_4植物,通过高水分利用效率来适应荒漠环境,其叶片大且肉质化程度高、水分含量大;红砂作为一种C_3植物,则通过维持较高蒸腾速率和低水分利用效率来适应环境,其叶片退化为小棒状、肉质化程度低[36]。2种植物叶片特性的不同必将导致其凋落物分解的差异,从而造成凋落物层下土壤酶活性的不同。这与焦泽彬等[16]研究发现阔叶与针叶凋落物对土壤酶活性影响不同的结果具有相似性。

4 结 论

UV-B辐射滤减提高了土壤脲酶和碱性磷酸酶活性,降低了土壤多酚氧化酶和木质素过氧化物酶活性,而这种规律在不同凋落物类型中表现出的响

应程度并不一致，珍珠凋落物层下土壤酶活性对UV-B辐射的响应更为明显。混合凋落物层下土壤酶活性较单一凋落物来说，其多酚氧化酶活性较低，说明混合凋落物土壤腐殖化程度较单一凋落物更高。凋落物类型对土壤酶活性的影响主要集中在表层土壤，随着土层加深，各类型下土壤脲酶和磷酸酶活性降低，多酚氧化酶活性增加。总的来说，UV-B辐射滤减和不同类型凋落物的混合可能更有利于凋落物分解，从而提高土壤肥力，促进荒漠植物的生长。

参考文献（References）：

[1] Daryl L Moorhead, Robert L Sinsabaugh. A theoretical model of litter decays and microbial interaction[J]. Ecological Monographs, 2006, 76(2): 151–174.

[2] 和文祥, 谭向平, 王旭东, 等. 土壤总体酶活性指标的初步研究[J]. 土壤学报, 2010, 47(6): 1232–1236. [He Wenxiang, Tan Xiangping, Wang Xudong, et al. Study on total enzyme activity index in soils[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(6): 1232–1236.]

[3] 朱鹏锦, 尚艳霞, 师生波, 等. 植物对UV-B辐射胁迫响应的研究进展[J]. 热带生物学报, 2011, 2(1): 89–96. [Zhu Jinpeng, Shang Yanxia, Shi Shengbo, et al. Research progresses on plant responses to UV-B radiation stress[J]. Journal of Tropical Biology, 2011, 2(1): 89–96.]

[4] 路锦, 张筱, 黄樱, 等. 氮沉降对森林凋落物分解过程中土壤酶和微生物影响的研究进展[J]. 湖南生态科学学报, 2020, 7(4): 54–61. [Lu Jin, Zhang You, Huang Ying, et al. Effect of nitrogen deposition on soil enzymes and microorganisms in the process of forest litters decomposition[J]. Journal of Hunan Ecological Science, 2020, 7(4): 54–61.]

[5] 张慧玲, 宋新章, 哀建国, 等. 增强紫外线-B辐射对凋落物分解的影响研究综述[J]. 浙江林学院学报, 2010, 27(1): 134–142. [Zhang Huiling, Song Xinzhang, Ai Jianguo, et al. A review of UV-B radiation and its influence on litter decomposition[J]. Journal of Zhejiang Forestry College, 2010, 27(1): 134–142.]

[6] 王少彬, 苏维瀚, 魏鼎文. 太阳紫外线的生物有效辐射与大气臭氧含量减少的关系[J]. 环境科学学报, 1993, 13(1): 114–119. [Wang Shaobin, Su Weihan, Wei Dingwen. Biologically effective radiation of solar ultraviolet radiation and the depletion of ozone layer[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1993, 13(1): 114–119.]

[7] Song X Z, Zhang H L, Jiang H , et al. Influence of elevated UV-B radiation on leaf litter chemistry and subsequent decomposition in humid subtropical China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2013, 13(5): 846–853.

[8] 王灿, 李虹茹, 湛方栋, 等. UV-B辐射对元阳梯田稻田土壤活性有机碳含量与温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(2): 383–391. [Wang Can, Li Hongru, Zhan Fangdong, et al. Effects of enhanced UV-B radiation on the content of soil active organic carbon and greenhouse gas emission from a rice paddy in Yuanyang Terraces[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(2): 383–391.]

[9] 吕志伟, 万国峰, 张朋, 等. CO_2倍增和UV-B辐射增强对大豆根际氨氧化细菌数量及土壤酶活的影响[J]. 大豆科学, 2012, 31(1): 69–72. [Lyu Zhiwei, Wan Guofeng, Zhang Peng, et al. Effects of doubled CO_2 and enhanced UV-B radiation on rhizosphere Ammonia-oxidizing bacteria and soil enzymes in soybean[J]. Soybean Science, 2012, 31(1): 69–72.]

[10] 娄运生, 程焕友, 韩艳. UV-B辐射增强下施氮对大麦根际土壤酶活性的影响[J]. 土壤通报, 2013, 44(5): 1151–1157. [Lou Yunsheng, Chen Huanyou, Han Yan. Effect of enhanced ultraviolet-B radiation and nitrogen levels on enzymatic activities in barleyrhizosphericsoil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2013, 44(5): 1151–1157.]

[11] 顾夏天. UV-B辐射增强对不同大麦品种土壤生物学特性的影响[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012. [Gu Xiatian. Effect of Enhanced UV-B Radiation on Soil Biological Properties in Barley Cultivars[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2012.]

[12] 林晗, 陈辉, 吴承祯, 等. 千年桐与毛竹凋落叶混合分解对土壤酶活性的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2012, 18(4): 539–545. [Lin Han, Chen Hui, Wu Chengzhen, et al. Effects of decomposition of *Aleurites montana* and *Phyllostachys pubescences* mixed foliage litter on activity of soil enzymes[J]. Chinese Journal of Applied Environmental Biology, 2012, 18(4): 539–545.]

[13] 陈光升. 华西雨屏区几种植被恢复模式凋落物的生态功能研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2008. [Chen Guangshen. Ecological Function of Litter in Several Patterns of Vegetation Restoration in Rainy Area of Western China[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2008.]

[14] 张冰冰, 万晓华, 杨军钱, 等. 不同凋落物质量对杉木人工林土壤微生物群落结构的影响[J]. 土壤学报, 2021, 58(4): 1040–1049. [Zhang Bingbing, Wan Xiaohua, Yang Junqian, et al. Effects of litters different in quality on soil microbial community structure in *Cunninghamia lanceolata* plantation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(4): 1040–1049.]

[15] 宋新章, 张慧玲, 江洪, 等. UV-B辐射对马尾松凋落叶分解和养分释放的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(8): 2106–2114. [Song Xinzhang, Zhang Huiling, Jiang Hong, et al. Effect of UV-B radiation on the leaf litter decomposition and nutrient release of *Pinus massoniana*[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(8): 2106–2114.]

[16] 焦泽彬, 李羿桥, 陈子豪, 等. 川西亚高山不同森林类型土壤酶活性对短期凋落物输入量变化的响应[J]. 应用与环境生物学报, 2021, 27(3): 608–616. [Jiao Zebin, Li Yiqiao, Chen Zihao, et al. Response of soil enzyme activities to short-term litter input in different types of forest in subalpine western Sichuan[J]. Chinese Journal of Applied Environmental Biology, 2021, 27(3): 608–616.]

[17] 韦昌林, 李毅, 单立山, 等. 降水变化对典型荒漠植物凋落物分解的影响[J]. 草地学报, 2022, 30(5): 1280–1289. [Wei Changlin, Li Yi, Shan Lishan, et al. Effects of different rainfall on litter decomposition of two typical desert bushwood[J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(5): 1280–1289.]

[18] 种培芳, 苏世平, 李毅, 等. 不同地理种源红砂幼苗对PEG胁迫的生理响应[J]. 草业学报, 2013, 22(1): 183–192. [Chong Peifang, Su Shiping, Li Yi, et al. Physiolodical responses to PEG stress of *Reaumuria soongorica* seedings from different geographical origins[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2013, 22(1): 183–192.]

[19] 单立山, 李毅, 任伟, 等. 河西走廊中部两种荒漠植物根系构型特征[J]. 应用生态学报, 2013, 24(1): 25–31. [Shan Lishan, Li Yi, Ren Wei, et al. Root architecture of two desert plants in central Hexi Corridor of Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(1): 25–31.]

[20] 陈宗瑜, 毕婷, 吴潇潇. 滤减UV-B辐射对烤烟蛋白质组变化的影响[J]. 生态学杂志, 2012, 31(5): 1129–1135. [Chen Zongyu, Bi Ting, Wu Xiaoxiao. Effects of reduced UV-B radiation on the variation of flue-cured tobacco proteome[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(5): 1129–1135.]

[21] 吴昊, 王理德, 宋达成, 等. 民勤退耕区不同年限退耕地土壤理化性质及酶活性[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(1): 191–199. [Wu Hao, Wang Lide, Song Dacheng, et al. Soil properties and enzyme activities of abandoned farmland in different years in Minqin [J]. Agricultural Research in Arid Areas, 2021, 39(1): 191–199.]

[22] 汪子微, 万松泽, 蒋洪毛, 等. 青藏高原不同高寒草地类型土壤酶活性及其影响因子[J]. 植物生态学报, 2021, 45(5): 528–538. [Wang Ziwei, Wan Songze, Jiang Hongmao, et al. Soil enzyme activities and their influencing factors among different alpine grasslands on the Qingzang Plateau[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2021, 45(5): 528–538.]

[23] 张令瑄, 谢婷婷, 王瑾, 等. 大田条件下UV-B辐射增强对大豆根际土壤相关指标的影响[J]. 江苏农业学报, 2016, 32(1): 118–122. [Zhang Lingxuan, Xie Tingting, Wang Jin, et al. Soybean rhizosphere soil parameters in response to enhanced UV-B radiation under field condition[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Science, 2016, 32(1): 118–122.]

[24] 焦志勇. 土壤脲酶的研究进展及发展前景[J]. 江西农业, 2016 (17): 84. [Jiao Zhiyong. Research progress and prospect of soil urease[J]. Jiangxi Agricultural, 2016(17): 84.]

[25] 吴金凤, 刘鞠善, 李梓萌, 等. 草地土壤磷循环及其对全球变化的响应[J]. 中国草地学报, 2021, 43(6): 102–111. [Wu Jinfeng, Liu Jushan, Li Zimeng, et al. Grassland soil phosphorus cycle and its response to global change[J]. Chinese Journal of Grassland, 2021, 43(6): 102–111.]

[26] 陈晓丽, 王根绪, 杨燕, 等. 山地森林表层土壤酶活性对短期增温及凋落物分解的响应[J]. 生态学报, 2015, 35(21): 7071–7079. [Chen Xiaoli, Wang Genxu, Yang Yan, et al. Response of soil surface enzyme activities to short-term warming and litter decomposition in a mountain forest[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(21): 7071–7079.]

[27] 朱媛君, 张璞进, 牛明丽, 等. 毛乌素沙地丘间低地主要植物群落土壤酶活性[J]. 生态学杂志, 2016, 35(8): 2014–2021. [Zhu Yuanjun, Zhang Pujin, Niu Mingli, et al. Soil enzyme activities of the main plant communities in inter-dune lowland of Mu Us Sandy Land[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(8): 2014–2021.]

[28] 梁晓玉, 崔周磊, 王洪成, 等. 木质素过氧化物酶的应用[J]. 生物学杂志, 2021, 38(3): 99–102. [Liang Xiaoyu, Cui Zhoulei, Wang Hongcheng, et al. Research in lignin peroxidase[J]. Journal of Biology, 2021, 38(3): 99–102.]

[29] 胡亚林, 汪思龙, 黄宇, 等. 凋落物化学组成对土壤微生物学性状及土壤酶活性的影响[J]. 生态学报, 2005, 25(10): 2662–2668. [Hu Yalin, Wang Silong, Huang Yu, et al. Effects of litter chemistry on soil biological property and enzymatic activity[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(10): 2662–2668.]

[30] 于德良, 雷泽勇, 张岩松, 等. 沙地樟子松人工林土壤酶活性及其影响因子[J]. 干旱区研究, 2019, 36(3): 621–629. [Yu Deliang, Lei Zeyong, Zhang Yansong, et al. Soil enzyme activity and its affecting factors under *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation in sandy land[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(3): 621–629.]

[31] 李勋, 张艳, 宋思梦, 等. 马尾松与乡土阔叶树种凋落叶混合分解过程中全碳释放的动态变化[J]. 植物研究, 2022, 42(2): 309–320. [Li Xun, Zhang Yan, Song Simeng, et al. Dynamic changes of total carbon release during mixed decomposition of leaf litter of *Pinus massoniana* and native broad-leaved tree species[J]. Bulletin of Botanical Research, 2022, 42(2): 309–320.]

[32] 葛晓敏, 吴麟, 唐罗忠. 森林凋落物分解与酶的相互关系研究进展[J]. 世界林业研究, 2013, 26(1): 43–47. [Ge Xiaomin, Wu Lin, Tang Luozhong. Review on research progress of relationships between enzyme and litter decomposition[J]. World Forestry Research, 2013, 26(1): 43–47.]

[33] 李茜. 黄土高原不同树种枯落叶混合分解对土壤性质的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013. [Li Qian. Effects of Mixed Litter Decomposition From Different Tree Species on Soil Properties in the Loess Plateau[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2013.]

[34] Kourtev P S, Ehrenfeld J G, Huan W Z. Enzyme activities during litter decomposition of two exotic and two native plant species in hardwood of New Jersey[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 34: 1207–1218.

[35] Gray D B, Mary K T, Julie E J. Interactions between crop residue and soil organic matter quality and the functional diversity of soil microbial communities[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2002, 34: 1073–1082.

[36] 马静, 单立山, 王珊, 等. 不同降水量条件下C_3植物红砂–C_4植物珍珠混生光合特性研究[J]. 草地学报, 2019, 27(4): 921–927. [Ma Jing, Shan Lishan, Wang Shan, et al. Studies on photosynthetic characteristics of C_3 plant *Reaumuria soongarica* and C_4 plant *Salsola passerina* in a mixed community under different precipitations[J]. Acta Agrestia Sinica, 2019, 27(4): 921–927.]

Desert shrub soil enzyme activity of UV-B radiation and litter decomposition response

WEI Changlin, LI Yi, SHAN Lishan, XIE Tingting
(College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: Exploring the response of soil enzyme activity to UV-B radiation and decomposition of different litters is crucial for revealing litter turnover and soil nutrient dynamics. The effects of UV-B radiation on soil enzyme activities of litters of *Reaumuria soongarica* and *Salsola passerina* and their mixture were studied by using simulated UV-B radiation filtration (mylar film method) and decomposition bag method. The following results are presented. (1) Radiation filtration increased the soil urease and alkaline phosphatase activities of different litters and promoted the soil enzyme activities of *S. passerina* shrub significantly, which increased by 45.45%, 58.28% and 39.04%, 117.65% in different soil layers (0−5 cm and 5−15 cm), respectively. The radiation filter minimizes the different litter reductions. However, soil polyphenol oxidase and peroxidase activities of lignin, which are the same soil enzyme activity of *S. passerina* thickets of inhibition effect, are observed in different soil reductions by 36.69%, 39.52% and 59.78%, 43.63%, respectively. Radiation filtration did not affect on soil cellulase activity. (2) Under radiation filtration and natural light conditions, the activity of polyphenol oxidase in the soil of mixed litters was lower than that of single litters, indicating that the degree of organic matter humification in the soil of mixed litters was larger than that of organic matter accumulation, and the degree of soil humification was high. (3) The effects of different litters on the enzyme activities of surface soil (0−5 cm) were observed. Soil urease and phosphatase activities decreased and polyphenol oxidase activities increased with the deepening of the soil layer.

Keywords: UV-B radiation; litter; arid desert; soil enzyme